

DIANLI YONGYOU FENXI
JI YOUWU GUANLI

电力用油分析 及 油务管理

孙坚明 孟玉婵 刘永洛



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力用油分析 及油务管理

孙坚明 孟玉婵 刘永洛

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了变压器油、汽轮机油、磷酸酯抗燃油的性能,以及它们在运行中性能的变化规律、监控质量标准、油质试验方法、监督与维护等相关知识,同时阐述了退出运行的废油和运行中油的处理技术,并汇集了相关的国内及国际标准、规范,内容丰富、新颖、实用性强。

本书可作为电力系统油务员的培训教材,也可作为高等院校电厂化学专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力用油分析及油务管理/孙坚明,孟玉婵,刘永洛编. —北京:中国电力出版社,2009

ISBN 978-7-5083-8093-3

I. 电… II. ①孙…②孟…③刘… III. ①电力系统—润滑油—研究②电力系统—液体绝缘材料—研究③电力系统—气体绝缘材料—研究 IV. TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 172304 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 312 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

 电力用油分析及油务管理

电力设备用油包括汽轮机、发电机、变压器、电抗器、断路器、互感器等设备中用的油品，涉及电气设备制造、电力工业、冶金行业、石油化工和铁路系统等领域。电力设备用油的油品质量直接关系到这些设备的安全经济运行，国内外各行业十分重视对油品的监督。电力行业历来重视油务监督和管理工作的，将其视为化学监督、绝缘监督的重要内容。

过去几十年中，我国已经建立了油品质量标准体系和运行维护管理体制，配备了专门的仪器设备和人员进行监督检测和维护，收到了良好的效果。随着电力工业的迅速发展，发电机组容量和供配电设备参数不断提高，1 000MW 机组已经投入运行，1 000kV 交流输变电设备、±800kV 直流输变电设备也将投运，相应地需要完善和加强对设备使用油介质的技术监督管理。为进一步提高油品监督检测工作的水平，提高从事油品分析工作人员的技术素质，原电力工业部部属电力科研院所、各大网省局都曾进行过多次油品监督检测技术培训考核工作，在专业技术培训工作中，大家深感需要一本科学、实用、系统的电力用油分析和监督管理技术读物。为此，作者收集了有关资料，编写出版了此书。

本书共分六章，以变压器油、汽轮机油和磷酸酯抗燃油分析检测技术为主要内容。主要包括变压器油（第二章）、汽轮机油（第三章）和磷酸酯抗燃油（第四章）三大部分；还包括检测技术人员需要的有关基础知识：石油化学基础及石油的炼制（第一章），油处理技术（第五章）和国内外常用监督标准（第六章），检测误差分析和数据处理知识（第六章）。此外，在附录中还收集了电力用油名词术语及相关常识等内容。作者力图将多年来电力系统对电力设备用油在运行、监督、管理、质量分析、标准制定和修订方面所做的大量工作加以总结，并结合自己的实践经验和研究成果，一并奉献给读者。

本书绪论、第一章由孙坚明编写；第二章、第三章由孙坚明、孟玉婵编写；第四章由刘永洛编写；第五章由刘永洛、孙坚明编写；前言、第六章和附录由孟玉婵编写；全书由孟玉婵统稿。在本书编写的过程中，曾得到有关同志的支持与帮助，在此一并表示感谢。

由于编写人员水平所限，且时间仓促，书中差错难免会出现，恳请读者批评指正。

作 者

2008 年 10 月 22 日

目 录

电力用油分析及油务管理

前 言

绪 论	1
第一章 石油化学基础及石油的炼制	3
第一节 石油化学基础	3
第二节 电力用油的炼制工艺	8
第二章 变压器油	13
第一节 变压器的结构和绝缘系统	13
第二节 变压器油的特性	22
第三节 运行中变压器油性能的变化	42
第四节 油质试验及其意义	59
第五节 变压器油的维护管理	68
第三章 汽轮机油	81
第一节 汽轮机润滑系统	81
第二节 汽轮机油的性能	83
第三节 运行汽轮机油性能的变化	97
第四节 油质试验及意义	101
第五节 汽轮机油的监督与维护	109
第四章 磷酸酯抗燃油	123
第一节 磷酸酯抗燃油的概念及特性	124
第二节 磷酸酯抗燃油的性能特点和变化规律	128
第三节 磷酸酯抗燃油的技术规范	137
第四节 磷酸酯抗燃油的应用及技术监督	141
第五章 油处理技术	153
第一节 退出运行的废油处理技术	153
第二节 运行中油的处理技术	168

第六章 电力用油监督检测常用标准 175

 第一节 变压器油监督检测常用标准..... 175

 第二节 汽轮机油监督检测常用标准..... 178

 第三节 磷酸酯抗燃油监督检测常用标准..... 180

附 录 183

 一、DL 419—1991 电力用油常用名词术语摘录 183

 二、油库的安全要求——油库储油油罐的防火距离 195

 三、T501 抗氧化剂的质量 196

 四、T746 防锈剂的质量 196

 五、常用酸碱溶液的配制、标定和保存 197

 六、不同温度下标准滴定溶液的体积补正值 199

 七、最低冷态投运温度下变压器油的最大黏度、
 最高倾点与牌号的对应关系 200

参考文献 201

绪 论

电力用油是一个模糊的名称。它实际上是专指电力行业使用的几种主要油品，即电气绝缘油（包括矿物和合成油品），汽轮机（含水轮机）用润滑油（简称汽轮机油）和磷酸酯抗燃油（液）两大类。至于电力行业使用的其他油品，如球磨机油、压缩机油、真空泵油、齿轮油和其他润滑油则应归属于机械油品类。因此，电力用油的研究对象主要是汽轮机用润滑油和电气绝缘油两大类。

一、电力行业的油务监督

电力系统油务监督是化学监督的一个重要内容，其工作内容是坚持以“预防为主”的方针，认真贯彻国家和电力行业有关标准的规程，广泛加强油质监督、开展气相色谱检测以排除油电气设备内的潜伏性故障，防止油质劣化，并围绕电力油品，对试验方法、新材料、新技术进行研究开发，制定和采取油质维护有效措施等。

1. 基建阶段的油品监管

在油品的储存、运输中，应特别注意油品的错混和防止水分及杂质的渗入。在以前的工作中曾出现过油品错混的情况，如在变压器油中混入了少量润滑油而使油的介质损耗试验项目不合格，给工程的建设造成了不应有的损失。因此，对于大批量桶装到货的油品，首先应逐桶核对标签牌号，确认无误后才能进行采样验收。对于大批到货的桶装油样，如果还需要存放一段时间，必须用防雨篷布盖住桶盖，或者将油桶倾斜，防止桶盖处聚集雨水，使水分渗入桶内。过去在现场曾多次出现过因雨水的渗入，桶内的绝缘油含水量大大超标的现象，影响了工程的后续进度。

2. 新油的验收和运行油的监督维护

新油的验收工作是非常重要的，必须在有经验的人员参与和指导下进行。采样、样品油的混合以及试验的全过程，都应按有关规程的要求执行。除此以外，还应着重强调：对于从国外进口的油品，应特别慎重，一定要逐桶核对产品名称、牌号与供货合同无误，在取样时要观察外观情况；并应严格按供货合同所附的技术规范和方法要求进行验收试验，而不能随意用国际通用方法或行业标准方法进行检验。如果本单位不具备验收条件，可请有条件的单位进行验收，以确保检验数据的准确性和可靠性，维护合同各方的正当权益。

对运行油的监督维护，应按运行油的质量标准和维护管理导则的要求执行。作为油务监督人员，不能只停留在油品的分析化验上，应该在油质出现异常情况时，能提出明确的意见和处置措施。因此，要求油务监督人员应经常与电气、汽轮机运行部门取得联系，协调、沟通才能真正搞好油质的监督维护，保证用油设备的安全。例如，汽轮机油乳化严重，应配合汽机人员寻找乳化的原因，适当调节轴封减少蒸汽的漏入或采取适当的油处理

措施；当色谱检测出现某些特征组分超标或异常时，应及时与电气部门联系，查找原因并果断提出处理意见，以保证电气设备的安全运行。

3. 油务管理

油务管理工作是一项很重要的工作，同时也是很繁杂的工作。它包括油品采购、储存、运输和使用过程中如何防止油品的错混、防止水分和杂质的侵入，以及防火、防爆、防止油品在流动过程中产生静电现象等一系列工作。同时，应建立各类设备所用油品的技术档案，包括油损耗指标等方面的内容。特别是对磷酸酯抗燃油，应采取人身安全保护措施，防止出现中毒现象。

二、运行油质量与设备、系统状况的关系

对运行设备中的油品，一定要注意进行维护管理，并按运行油质量标准的要求进行油质的检验和运行油维护管理导则进行维护管理。每一位从事油务工作的人员必须明确，设备内运行油质量的好坏将直接影响设备和系统的安全运行。但是还应看到，设备和系统本身由于设计、制造、安装（或检修）等诸多方面的原因，也会加速运行中油质的劣化，引起恶性循环，从而缩短油品和设备的使用寿命。例如，对于高电压、大容量的用油电气设备，要求密封性很严，如果设备本身密封性能差，会渗入大量潮湿空气，必然导致油品和绝缘材料中含水量增大，从而降低设备的整体绝缘水平；同时如果运行温度持续过高，也会导致油质的严重劣化。又如，对于大型具有强油循环的变压器，为了加快设备的冷却，潜油泵的流速较快，其结果可能导致油中静电荷的积聚，产生局部放电现象，从而对运行设备构成威胁。这一问题的解决办法：一是将潜油泵的出口管加大，使流速降低，减少静电荷的累积；二是向油中加入抗静电添加剂（BTA），消除静电荷，从而保证设备的安全。

对于汽轮机组，特别是单机容量 300MW 及以上的设备，一般是润滑系统与调节系统分开的。这样就对润滑油提出了许多新的要求，特别是对调节系统使用的抗燃油，油中洁净度的控制是这类机组的共性要求。在机组安装、启动和运行期间，一定要按电厂用运行矿物汽轮机油维护管理导则（GB/T 14541—2005）中的要求，经大流量油彻底冲洗，油品经精密过滤符合导则中要求的洁净度标准后，方可投入运行。否则，可能造成大轴、叶片的拉伤、划痕和伺服阀的卡涩而引起事故。

对于调节系统应用的磷酸酯抗燃油，油务监督人员一定要引起足够的重视，应在汽轮机运行中，旁路再生系统必须投入使用，并经常检查、更换滤芯。同时应注意调节系统的油管路尽量与蒸汽管道隔离开，避免出现局部过热点，一旦发现应立即清除，否则会使磷酸酯抗燃油产生热分解现象，导致酸值快速增大，使油质劣化变坏。

综上所述，油务工作的好坏、油质合格与否，将直接影响到电力用油设备的使用寿命和电力生产的安全经济运行。

第一章

石油化学基础及石油的炼制

第一节 石油化学基础

一、石油的化学组成

(一) 石油的元素组成

电力系统广泛使用的变压器油、汽轮机油、断路器油、电缆油等主要由天然石油炼制而成。石油属可燃性有机岩，即属于由植物或动物等有机物遗骸生成的可燃性矿物，是一种流动或半流动的黏稠状液体。多为暗黑色、褐色或暗绿色，可发出暗绿色或蓝色荧光。通常石油密度小于 1g/cm^3 ，多介于 $0.80\sim 0.98\text{g/cm}^3$ (20°C) 之间。

石油的化学组成十分复杂。不同产地或同一产地不同油井开采出来的石油的化学组成也不相同，因此其物理、化学性质也各不相同。但是，组成石油的元素并不复杂，主要由碳 (C) 和氢 (H) 两种元素组成。在大部分石油中，主要元素——碳的含量介于 $84\%\sim 87\%$ 之间，氢的含量介于 $12\%\sim 13\%$ 之间，而硫 (S)、氮 (N) 及氧 (O) 的总含量一般约占 $1\%\sim 3\%$ 。它们与碳、氢形成的硫化物、氮化物、氧化物和胶质、沥青质等非烃化合物大都会给原油加工及产品质量带来不利影响，因此必须在炼制过程中加以去除。此外，石油中还发现有微量的铁、镍、钒、铜、钾、钠、钙等金属元素及氯、碘、磷、砷等非金属元素。在石油中这些元素并不以单质存在，而是以碳氢两元素为主组成的有机化合物存在。

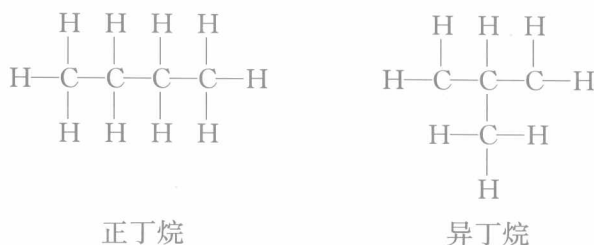
(二) 石油的烃类组成

分子中只含有碳和氢两种元素的有机化合物叫“烃”，是石油中基本的有机化合物，其他各类型的有机化合物都可看作由其相应的烃衍生出来的。按照分子结构的不同，烃类化合物大体可分为烷烃、环烷烃、芳香烃和不饱和烃四类。不同烃类对各种石油产品性质的影响也各不相同。根据石油中所含烃类成分的不同，石油可分为石蜡基石油、环烷基石油和中间基石油三类。石蜡基石油含烷烃较多，环烷基石油含环烷烃、芳香烃较多，中间基石油介于两者之间。我国的原油以石蜡基居多，如大庆、南阳、中原原油，而新疆、辽河原油主要属中间—石蜡基，部分为环烷基原油，胜利、江汉原油属中间基。

1. 烷烃

烷烃是指分子中的碳原子之间以单键相连，碳原子的其余价键都与氢原子相结合形成的化合物，烷烃也称作饱和烃，如甲烷、乙烷、丙烷、丁烷等。在一系列烷烃中，每增加一个碳原子就相应增加两个氢原子，其化学通式为 $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (n 为从 1 开始的正整数)。这些组成相差一个或数个 CH_2 的化合物组成一个系列叫同系列。同系列中的各个化合物叫

同系物。烷烃分子中碳原子成直链状的烃叫正构烷烃，直链上有分支的叫异构烷烃，如



通常（在常温、常压下）含 1~4 个碳原子的烷烃是气体，含 5~15 个碳原子的烷烃为液体，是石油的主要成分。自十六烷（ $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ）及以上的烷烃是固体，称为蜡。随着烷烃分子量的增大，其沸点、折射率、密度依次增高，异构体烷烃的沸点较正构烷烃低。

烷烃的化学性质比较稳定，通常与强酸、强碱、氧化剂等都不起反应。但在高温或有催化剂等条件下能与空气中的氧作用，生成一系列氧化产物，如醇、醛、酮、酸类。

石油中所含的液态烷烃，其化学结构是极其复杂的。随着馏分的升高，烷烃的含量减少。含液态烷烃的石油馏分，广泛地用作生产润滑油及燃料等。

2. 环烷烃

环烷烃又称环状烷烃，其通式为 C_nH_{2n} ($n \geq 3$)。由于是碳原子上所有的价都已饱和，与烷烃相似。环烷烃也是一种化学性质很稳定的烃类，由于它的燃烧性较好、凝点低、润滑性好，因此环烷烃是润滑油的良好成分。石油中环烷烃的结构非常复杂，主要由五圆环及六圆环组成，它们可为单环、双环，也可为多环，润滑油中含单环环烷烃多则黏温性能好。

3. 芳香烃

芳香烃的主要特征就是分子中至少有一个苯环（ C_6H_6 ，）即苯属芳香烃。芳

香烃的化学通式为 $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ ，苯是芳香烃中最简单的一个。此外还有一些分子中至少含有两个共轭双键的四圆、五圆、七圆及八圆环都可归入芳香烃。芳香烃不溶于水，密度、折射率都较大，由于其结构中的共轭双键能相互作用，因此芳香烃分子具有特有的稳定性，氧化后主要生成酚及其缩合物胶质及沥青质。

润滑油中芳香烃的适量存在能起到天然抗氧化剂作用，并能改善变压器油的析气性。芳香烃含量过多会严重影响油的氧化安定性，因此国内许多炼油厂多采用深度精制加抗氧化剂的工艺生产普通变压器油，而以适度精制加抗氧化剂后，再调入适量浓缩芳香烃或人工合成芳香烃（如烷基苯）的办法，使调好的超高压变压器油不但具有良好的氧化安定性，同时具有良好的析气性。

4. 烯烃和炔烃

在烃化合物中含有一个双键（ $\text{C}=\text{C}$ ）的化合物，叫做烯烃，其化学通式为 C_nH_{2n} 。在烃化合物中含有一个三键（ $\text{C}\equiv\text{C}$ ）的化合物，叫做炔烃。炔的化学通式为 $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ ，烯烃和炔烃统称不饱和烃。两者的物理性质基本上与烷烃相似，密度小于 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ，不溶

于水，易溶于有机溶剂。由于所含 $C=C$ 双键或 $C\equiv C$ 三键中的 π 键较弱，容易极化，也容易断开，其化学稳定性最差。不饱和烃在原油中含量极少，主要是在二次加工中产生的。

5. 非烃化合物

石油中除含有大量烃类化合物外，还含有少量非烃化合物，如含硫化合物、含氧化合物、含氮化合物及胶质、沥青质等，它们的存在可对设备产生腐蚀或降低油品的化学稳定性。石油中此类化合物越多，则油的颜色越深。

二、石油产品分类及牌号的划分

(一) 石油产品分类

我国参照采用国际标准 ISO 8681—1986 制定了石油产品及润滑剂的总分类（GB 498—1987）、润滑剂和有关产品（L 类）的分类 第 1 部分：总分组（GB 7631.1—1987）及润滑剂和有关产品（L 类）的分类 第 10 部分 T 组（汽轮机）（GB 7631.10—1992）等国家标准，见表 1-1～表 1-3，这些标准根据其应用领域将润滑剂产品分成 19 个组，并将变压器油、断路器油、电容器油、电缆油都并入 L 类电器绝缘组（N 组），汽轮机油列入 L 类汽轮机组（T 组）。对每个组内不同产品的细致分类，尚未全部颁布，如电器绝缘组中四种产品的代号仍为待定。

表 1-1 石油产品及润滑剂的总分类

类别	各类别的含义	类别	各类别的含义
F	燃料	S	溶剂和化工原料
L	润滑剂和有关产品	W	蜡
B	沥青	C	焦

注 摘自 GB 498—1987。

表 1-2 润滑剂和有关产品（L 类）的分类

第一部分：总分组

组别	应用场合	组别	应用场合
A	全损耗系统	P	风动工具
B	脱膜	Q	热传导
C	齿轮	R	暂时保护防腐蚀
D	压缩机（包括冷冻机和真空泵）	T	汽轮机
E	内燃机	U	热处理
F	主轴、轴承和离合器	X	用润滑脂场合
G	导轨	Y	其他应用场合
H	液压系统	Z	蒸汽气缸
M	金属加工	S	特殊润滑剂应用场合
N	电器绝缘		

注 摘自 GB 7631.1—1987。

表 1-3 汽轮机润滑剂分类

组别 代号	应用 范围	特殊应用	更具体应用	组成和性质	品种代号 L-
T	汽 轮 机	蒸汽、直接或 齿轮连接到负荷	一般用途	具有防锈性和氧化安定性的深度精制的 石油基润滑油	TSA
			特殊用途	不具特殊难燃性的合成液	TSC
			难燃	磷酸酯润滑油剂	TSD
			高承载能力	具有防锈性、氧化安定性和高承载能力 的深度精制石油基润滑油	TSE
		气体（燃气）、 直接或齿轮连接 到负荷	一般用途	具有防锈性和氧化安定性的深度精制的 石油基润滑油	TGA
			较高温下 使用	具有防锈性和氧化安定性的深度精制的 石油基润滑油	TGB
			特殊用途	不具特殊难燃性的合成液	TGC
			难燃	磷酸酯润滑油剂	TGD
			高承载能力	具有防锈性、氧化安定性和高承载能力 的深度精制石油基润滑油	TGE
		控制系统	难燃	磷酸酯控制液	TCD
		航空涡轮发动 机			TA
		液压传动装置			TH

注 摘自 GB 7631.10—1992。

(二) 电力用油牌号的划分

(1) 变压器油。变压器油（GB 2536—1990）：将变压器油按低温性能分为 10、25 和 45 三个牌号，其应用范围适用于 330kV 及以下的变压器和有类似要求的电气设备。

此标准正在依据电气设备用液体 变压器和开关设备用矿物绝缘油（IEC 60296—2003）修订，目前已提出送审稿，其中对变压器油的分类，取消了 GB 2536—1990 中按低温性能分为 10、25 和 45 三个牌号，而是按添加抗氧化剂量来进行划分，同时提出通用要求和特殊要求。要注意采用新标准。

(2) 超高压变压器油。我国石油化工行业标准超高压变压器油（SH 0040—1991）将超高压变压器油按低温性能分为 25、45 两个牌号，适用于 500kV 变压器及有类似要求的电气设备。国内外均有超高压设备用油的企业标准。在修订中的 GB 2536 中将此油归特殊要求类。

(3) 高压充油电缆油。各企业的标准并不完全统一，无统一牌号。

(4) 断路器油。按我国石油行业标准——断路器油（SH 0351—1992），断路器油仅一种牌号。

(5) 汽轮机油。L-TSA 汽轮机油（GB 11120—1989）（该标准正在修订）中定义 L-TSA：汽轮机油是由深度精制的基础油加抗氧剂和防锈剂等调和而成的。以国际惯例按 40℃运行黏度中心值将汽轮机油分为 32、46、68 和 100 四个牌号。

GB 11120—1989 标准规定的 32、46、68 和 100 四个牌号汽轮机油的使用范围与已于

1992 年废止的汽轮机油（GB 2537—1987）中四种油相当，其中，L - TSA32 油适用于 3 000r/min 及以上的汽轮机组和 1 000r/min 以上的水轮机组。L - TSA46 油适用于 2 000～3 000r/min 汽轮机组和 1 000r/min 以下的水轮机组，而 L - TSA68 油和 L - TSA100 油则适用于舰船汽轮机油。

GB 11120—1989 将油按不同质量分为优级品、一级品和合格品三个等级，并增加了黏度指数、起泡性试验、液相锈蚀试验、铜片试验和空气释放值等五项指标（注意采用此标准的最新修订版，其指标和类别均有变化）。

（三）石油添加剂的分类

根据我国石油化工有限公司标准石油添加剂的分类（SH/T 0389—1992）的划分，石油添加剂产品的类别名称用汉语拼音字母“T”表示，并按应用场合分成润滑剂添加剂、燃料添加剂、复合添加剂和其他添加剂四部分。将每一部分添加剂按相同作用分为一个组，同一组内根据其组成或特性的不同分成若干品种。

电力用油中使用的添加剂基本上都属于润滑剂中添加剂部分（见表 1 - 4）。

表 1 - 4 石油添加剂的分组和组号

	组 别	组号		组 别	组号
润 滑 剂 添 加 剂	清净剂和分散剂	1	燃 料 添 加 剂	消烟剂	20
	抗氧防腐剂	2		助燃剂	21
	极压抗磨剂	3		十六烷值改进剂	22
	油性剂和摩擦改进剂	4		清净分散剂	23
	抗氧化剂和金属减活剂	5		热安定剂	24
	黏度指数改进剂	6		染色剂	25
	防锈剂	7	复 合 添 加 剂	汽油机油复合剂	30
	降凝剂	8		柴油机油复合剂	31
	抗泡沫剂	9		通用汽车发动机油复合剂	32
	其他润滑剂添加剂	10		二冲程汽油机油复合剂	33
燃 料 添 加 剂	抗爆剂	11		铁路机车油复合剂	34
	金属钝化剂	12		船用发动机油复合剂	35
	防冰剂	13		工业齿轮油复合剂	40
	抗氧防胶剂	14		车辆齿轮油复合剂	41
	抗静电剂	15		通用齿轮油复合剂	42
	抗磨剂	16		液压油复合剂	50
	抗烧蚀剂	17		工业润滑油复合剂	60
	流动改进剂	18		防锈油复合剂	70
	防腐蚀剂	19			

石油添加剂的名称用符号表示。石油添加剂的品种由 3 个或 4 个阿拉伯数字组成的符号来表示，其第一个阿拉伯数字（当品种由 3 个阿拉伯数字所组成时）或前二个阿拉伯数字（当品种由 4 个阿拉伯数字所组成时），总是表示该品种所属的组别（组别符号不单独

使用)。

石油添加剂名称的一般形式如下：



例如：T501。

T——类（石油添加剂）；

501——品种（表示抗氧剂和金属减活剂组中的 2，6 -二叔丁基对甲酚，其第一个阿拉伯数字“5”表示润滑剂添加剂部分中抗氧剂和金属减活剂的组别号）。

其他电力用油中常用的添加剂如 L - TSA 汽轮机油中使用的防锈剂——烯基丁二酸的符号用 T746 表示；抗泡沫剂中的非硅类丙烯酸酯聚合物用 T901 表示等。

第二节 电力用油的炼制工艺

油品的生产工艺通常是根据原油的性质和产品的要求而定，由石油炼制生产电力用油的工艺过程大致分为原油预处理、蒸馏、精制和调和等工序，最后得到成品油，如图 1 - 1 所示。

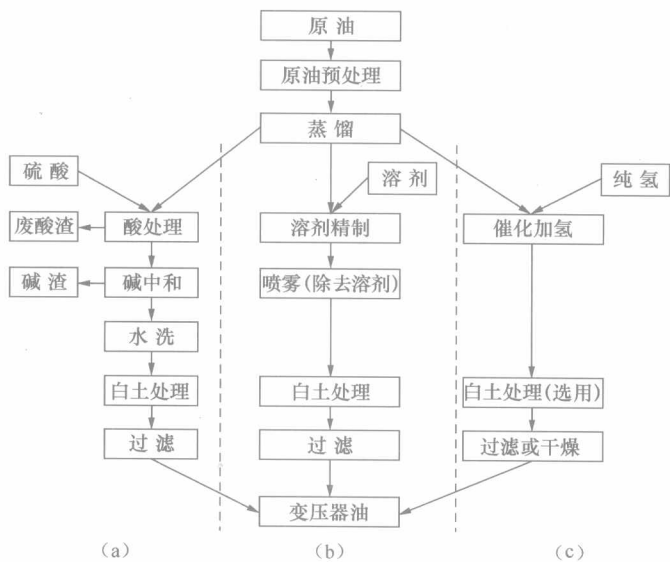


图 1 - 1 变压器油基本精制工艺流程

(a) 硫酸法；(b) 溶剂精制法；(c) 催化加氢工艺法

由图 1 - 1 可以看出，原油经预处理和常减压蒸馏等工序后，按照产品要求得到的馏分油称作基础油。基础油馏分主要根据产品的黏度、闪点等性能指标要求进行切割，然后送入下一工序。脱蜡的目的是使油品获得必要的凝点和倾点，以满足产品低温性能的要求，蒸馏工序是为了有选择地切割符合使用要求的馏分，而精制则是除去馏分油中非理想组分的工艺过程，因此采用合理的精制方案及精制深度十分重要。以变压器油为例，为了

得到优质变压器油，应尽量选用环烷基原油，但由于环烷基原油日益减少，许多国家的炼油厂都逐渐转变为用石蜡基原油生产变压器油。显然，由于两种原油性质根本不同，其精制方案也显然不同，在精制深度的选择方面也有所不同。国外一些厂商采用适度精制的工艺，以保留油中含有的天然的抗氧化剂，从而获得油品的抗氧化安定性及良好的电气性能，这与我国普遍采用的深度精制后添加抗氧剂的生产工艺完全不同。此外，由于对产品性能的要求不同，油品的生产工艺也随之作出相应的调整。现代油的加工使用了三种主要方法（见图 1-1）：硫酸法、溶剂精制法、催化加氢工艺法。

精制工艺的双重目的：

- (1) 选择出特性最合乎要求的油的馏分；
- (2) 将那些会严重影响油的氧化安定性、电气绝缘性能和低温流动性的有害成分清除掉或将其影响减少到最小程度。

不符合要求的成分包括氮和氧的化合物，大多数硫化合物，焦油沥青和不饱和烃以及固体烃类，特别是无定形石蜡和晶状石蜡。

一、预处理

原油一般都和油田水一起从油田开采出来，虽经沉降分离，但仍有一定数量的水分、泥砂、盐类等杂质掺杂其中，因而在分馏之前必须进行脱盐、脱水，此过程即原油预处理。

油田水主要来自土壤渗透的雨水和沉积岩沉积时保留下来的沉积海水，这两种水的存在使油田水含有大量无机盐和少量有机盐。它们的存在会腐蚀设备，降低热效率或造成管线堵塞，因此在蒸馏前必须先行除去。

原油脱盐、脱水的方法很多，如加热原油使油水乳浊液分解而将油水分离，杂质沉淀，或向原油中添加破乳剂降低油中水的含量，常用的方法是电化学方法。

二、常减压蒸馏

常压蒸馏是根据原油中各类烃分子沸点的不同，用加热和分馏设备将油进行多次部分汽化和部分冷凝，使汽液两相充分进行热量和质量交换，以达到分离的目的。一般 35~200℃的馏分为直馏汽油馏分；175~300℃的馏分为煤油馏分；200~350℃为柴油馏分；350℃以上的馏分为润滑油原料。

常压蒸馏塔底得到的重油是炼制润滑油的原料，由于它是 350℃以上的高沸点馏分，如果用常压蒸馏来进行分离，加热温度就得高达 350℃以上，在这样的高温下，会产生烃分子的裂解，引起加热炉管结焦。为了既能进行蒸馏分离又不致发生烃分子裂解，必须采用减压蒸馏。

减压蒸馏是用抽真空的办法，在减压塔内使油在低于大气压力的情况下进行热交换和质量交换的分馏过程，这样可使馏分油的沸点大大降低。润滑油馏分就可以在较低温度下汽化馏出，而不致产生裂解。减压塔真空度控制在 5.3~6.7kPa，从减压塔侧线可以引出各种润滑油馏分或催化裂化的原料，塔底残留的油叫减压渣油，可作制取石油沥青的原料或作锅炉燃料。

三、精制

常减压蒸馏所得到的馏分油中，由于仍含有一些不良成分（如含硫化合物、含氧化合物、含氮化合物、胶质、沥青质等）而不能直接使用，还必须进一步进行精制。常用的精制方法如下：

（一）酸碱精制

这一传统方法包括用浓度为 93%~98% 的硫酸处理馏分油，继之搅拌，酸渣分离，碱中和，水洗和白土处理。酸的用量主要取决于所需精制的深度，它基本在 2%~20% 范围内变化。过去最好的变压器油都是用这种工艺生产的，但是，除了会对环境造成污染外，该方法还存在两个主要缺点：

（1）因为硫酸的选择性不够，有用的成分与有害的成分一起被清除掉了，所以，该方法与其他两种比较现代的精制方法相比，单位体积馏分的回收率较低，造成资源的浪费。

（2）生成的酸渣是无用的废物，并且酸渣对环境的污染是多方面的，如果以环境安全允许的方式将它们处理，则所需费用昂贵。所以此处理方法必须淘汰，改用其他的精制方法就显得非常必要。

（二）溶剂精制（萃取）

这种工艺主要是依据在一种特定的溶剂中馏分油中不希望存在的化合物具有选择性的溶解度。使用最广泛的溶剂是糠醛，有时也用酚。该方法是在一定的温度条件下，利用糠醛、酚、丙酮等溶剂对馏分中的理想成分溶解能力差，但对馏分中的非理想成分（如环烷酸、多环短侧链芳烃和环烷烃、胶质、沥青质及其他硫、氮、氧的化合物等）都能溶解在溶剂中的特性，从而将其分离出去，使所得到的油品的黏温性能得到改善，并可以降低油品的残炭值和酸值，提高其化学稳定性。将分离出的油品用蒸馏的方法将溶剂回收后，便可得到抽出油。抽出油再经过白土补充精制，将其中的胶质、沥青质和稠环芳烃等不理想的成分除去后，便可得到基础油。

溶剂精制具有收率高、成本低、不排酸渣和不污染环境等优点，回收的溶剂还可以继续使用。因而该方法被广泛应用于润滑油的精制。

（三）催化加氢精制

这种方法是润滑油精制处理中的最新方式。据有关报道，目前在世界上的成品润滑油市场中，约有 70% 的成品油是用催化加氢工艺精制而成的。它包括在压力下对馏分油加氢，并在催化剂存在时升高它的温度。加氢精制可分为轻度加氢和严格的全催化加氢，两种方法都可用来获得最满意的终端产品。

现代加氢工艺是在具有特定结构及性能的催化剂作用下，馏分油和氢在 350℃ 的温度、175kPa 的压力下，通过在催化剂活性表面上进行脱硫、脱氮、脱环烷酸，使生成油的颜色、热安定性和氧化安定性都有明显的改善，芳烃含量也有所下降。然后再进行芳烃的加氢饱和，使多环芳烃都转化为饱和烃，而不发生大量裂化，多环芳烃饱和率在 90% 以上。同时，通过催化加氢还可以使十八碳以上的固体烃（如石蜡等）转化为十八碳以下的液体烃。尼纳斯公司的润滑油 100% 为催化加氢的产品。

获得满意的成品油所需要的氢化作用的深度将随所用原油的馏分组成而变化。所以，

这一催化加氢工艺必须对四个可变因素（即温度、压力、催化剂活性和时间）予以平衡和控制。当催化剂老化并使催化效率稍有降低时，就必须调节其他三个变量的值来加以补偿。

（四）白土补充精制

经过酸碱精制或溶剂精制后的油，仍残存有少量胶质、沥青质、环烷酸皂、酸渣及残余溶剂等，这些杂质的存在，不仅会对设备产生腐蚀，同时也会降低油品的化学稳定性和电气性能。因此，还要再经一次白土吸附处理，作为前一阶段精制的补充精制。

天然白土是一种多微孔，具有吸附作用的矿物质，它的主要成分是硅酸铝、氧化铝和一些氧化铁、氧化银等。白土的形状是无定型或结晶状的白色粉末，表面具有很多微孔，其活性表面积为 $100\sim 300\text{m}^2/\text{g}$ ，高度密集的孔隙和很大的比表面，使白土微粒能将油中胶质、沥青质、溶剂等极性物质吸附在微孔表面，而白土对油的吸附作用很低。因此，利用白土所具有的这一选择性吸附的特性，作为酸碱精制和溶剂精制的补充，用于进一步提高油品的安定性并改善油品的颜色。

四、脱蜡

为了改善油的低温流动性，在润滑油用酸碱精制和溶剂精制的生产过程中通常要进行脱蜡。蜡虽然不是有害物质，但它是润滑油中的非理想组分，影响油的低温流动性。因为常温下在油中呈溶解状态的蜡在低温下又会从油中析出来，以致影响油品流动。温度越低，析出的蜡越多。在生产润滑油特别是生产变压器油、断路器油等电气用油时，都要进行脱蜡。脱蜡的方法如下。

（一）冷冻脱蜡

通过冷冻装置，将含蜡的油料冷冻到一定的低温，使蜡从油中析出来。用压滤机或离心分蜡机将油和结晶状的蜡分开，从而使油品的凝点降低。冷冻脱蜡法适用于低黏度而且要求脱蜡深度不大的油品，如 10 号变压器油等。对高黏度和要求低凝点的油，由于油在低温下黏度变得很大，使油和蜡无法分开，因此不宜采用此法。

（二）溶剂脱蜡

适用于高黏度和要求低凝点的油品。溶剂脱蜡是利用溶剂能很好地溶解润滑油馏分中的油，但不能溶解蜡的特性。在低温下含蜡油中加入溶剂后，可将蜡析出，而油则溶解在溶剂中，再经过滤器将油和蜡分开。将滤液中的溶剂回收后，则可得到低凝点的润滑油馏分，如 25 号变压器油基础油。

常用的溶剂有酮类（丙酮）和苯系物（苯、甲苯）的混合物。丙酮对蜡的溶解度很低，加入丙酮可使蜡的结晶凝聚变为大颗粒，以便从油中滤除。苯的作用是增大溶剂对油的溶解能力，但由于苯的冰点太高（ $+5.5^\circ\text{C}$ ），在低温下无法使用，因而再加入甲苯（冰点 -95°C ）用以降低混合溶剂的冰点，以保证在 $-30\sim -40^\circ\text{C}$ 低温情况下，苯的结晶不致析出。三种溶剂间的比例以及油与溶剂的比例要根据脱蜡油的性质和产品对凝点的要求而定。

（三）尿素脱蜡

尿素的结构式为 $\text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{NH}_2$ 。尿素脱蜡是利用尿素可呈螺旋状排列在油中正构

